

特集記事 6

廃棄物処理とパイロメタラジー

古角雅行 東京都清掃研究所 工学博士
Masayuki Kokado

Municipal Solid Waste Treatment and Pyrometallurgy

1 はじめに

廃棄物がニュースにならない日はないと言ってよいほどこの問題への関心は極めて高い。都市の繁栄と廃棄物処理とが如何に密接な関係にあったかは歴史を紐解くまでもなく、古来、遷都のモチベーションにさえなり得たことは周知のとおりである。これは処理技術の未熟さが原因ではなく、人類の存続にとって廃棄物対策が如何に困難なテーマであり、かつ永遠の課題であるかを示すことに他ならない。

経済の冷え込みに依る排出量そのものの減少や施設整備の進展に伴い、ごみ問題は量から質にテーマがシフトし、状況は大きく変化したかの感が無くもない。しかし、廃棄物問題の原点が無害化と減量にある点は変わるはずもない。

最終処分の対象が焼却残渣に替わりその減量・減容化が急務になると同時に、ごみ焼却飛灰無害化への要請とから溶融技術が注目されるに至った。溶融法が重金属やダイオキシン対策、さらには潜在的資源化技術として期待され、周辺課題の整理もあって急速な広がりを見せ、加えて、さらなる資源化・無害化指向からガス化・溶融技術を中心とした次世代技術の論議が喧しい。

溶融技術が鉄鋼・非鉄精錬分野における永い経験と高度な技術の蓄積を有する成熟した技術であり、焼却残渣の無害化や資源化再利用に最も近い位置にあるとの認識に間違いはないであろう。しかし、耳障りの良いキーワードとそれへの期待が、すべてのケースの一般解として成立するかの誤解を生んでいることも否定できず、環境技術の再生にあたりパイロメタラジーとの連携が不可欠になっている。

2 都市ごみ処理の現状と課題

廃棄物は、排出源や品目が明らかな「産業廃棄物」と一

般家庭を主な排出源とする「一般廃棄物」とに区分される。その量的関係は、1993年時点で産業廃棄物が3億9,700万トン／年に対して一般廃棄物は4,934万トン／年で、産業廃棄物の一割強を占めるに過ぎない。しかし、両者の組成性状の差異は顕著であり、前者が均質、安定かつ量的管理が容易であるのに対して、後者は不均一で変動が大きく、しかも発生量が施設規模に依存し国内に広く分散するなど、その扱いや処理の困難性は全く様相を異にする。

2.1 処理の現状

平成6年度の一般廃棄物排出量は約5,050万トン(図1)、狭隘な国土と過度の人工集中という我が国の特殊事情もあって、大量・高速処理技術として最も安定した性能が期待できる焼却方式が普及している。平成6年度の焼却量は約3,900万トンであり、先進国のなかでも1,800を超える突出した焼却施設を保有し、焼却率は約77%に達する¹⁾。

焼却残渣の発生率を焼却量の10%と仮定すると、平成6

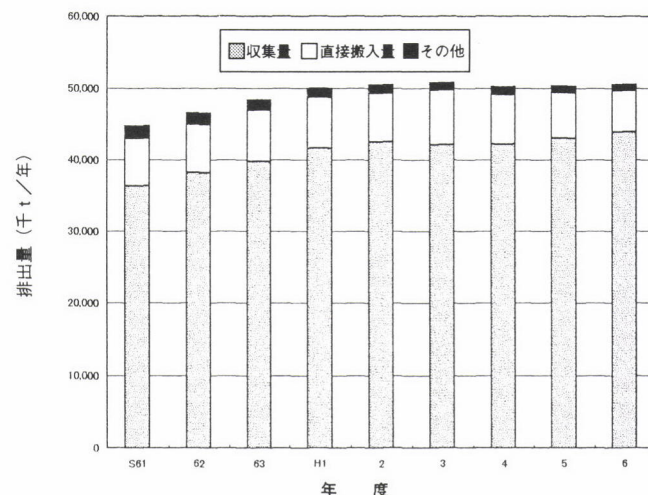


図1 日本の一般廃棄物排出量

年度の焼却残渣は全国で約390万トンになるが、そのほとんどが埋立処分されている。

この都市ごみ処理施設については、昭和38年を初年度とする廃棄物処理施設整備計画が平成8年から始まった五カ年計画で第8次になり、一般廃棄物処理施設のみで4兆5千億円弱、総額5兆円強の予算規模に達し²⁾、投資的経費のみで年間1兆円を超える我が国の廃棄物事情を物語っている(図2)。

2.2 ごみ処理の課題

「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」(法律第137号)では、ごみ処理の目的を「生活環境の保全及び公衆衛生の向上」にあるとしている。

ごみ処理の課題がその量と質がもたらすテーマにあり、目的が無害化と減量に絞られることは今後も変わらないであろう。しかし、無害化の質と減量の中身は時代と共に大きく様変わりし、衆目の度合も一昔前とは隔絶の感がある。

3 溶融技術導入の背景

廃棄物分野における溶融施設の1号機は釜石市が昭和54年に導入した直接溶融炉で、灰溶融の1号機は昭和60年埼玉東部清掃組合の導入であった。以後、暫時、導入事例は増加したものの、加速度的な増加は平成3年の法改正を契機とする。

技術導入の動機は、特別管理一般廃棄物無害化技術としての法指定、施設整備計画策定に際しての必須要件化およびごみ焼却施設から排出されるダイオキシン類の90%以上を占める焼却残渣無害化にある。

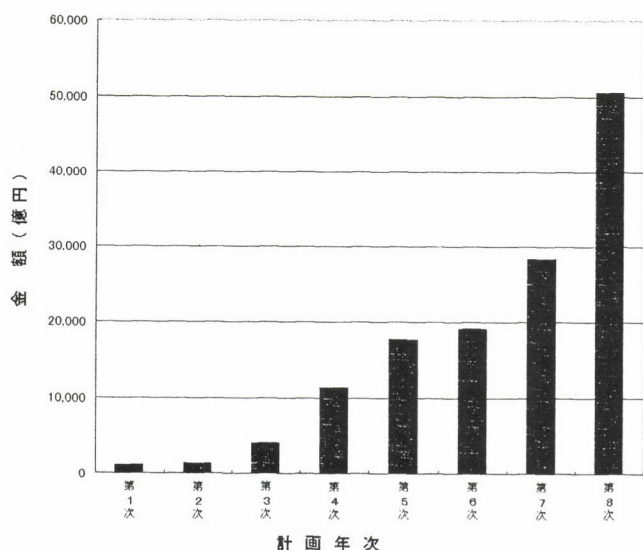


図2 施設整備計画経費の推移

平成9年度末で、全国で稼働中の溶融処理施設は21施設(灰溶融施設:17、直接溶融施設:4)、計画施設を合わせると、平成15年度で42施設(灰溶融施設:35、直接溶融施設:7)が稼働することになっている³⁾。ここに至ってエコセメント、焼結、ガス化溶融等、高熱処理プロセス選択肢の広がりもあってか、模様眺めの感がある。しかし、これからのごみ問題の中心、すなわち焼却残渣の処理・処分とは、有限の処分場容量に対する究極の減量化措置として、また最終処分場が新たな汚染源に繋がらないことへの対応に他ならない。

4 溶融技術に対する期待と批判

導入事例増加の背景には、既往の分野で完成された技術に対する素直な信頼があるものの、技術論にまで昇華するには至っておらず、直感に基づく期待と批判が錯綜する。

4.1 溶融技術に対する期待

4.1.1 重金属対策としての溶融

溶融技術導入当初の目的は、焼却残渣に含まれる重金属をスラグ中に封じ込めることにあった。これは、焼却残渣の主成分が代表的ガラスの一つであるアルミノケイ酸塩ガラス($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$)の主成分に類似していることから容易にガラス質のスラグが得られ、パーセントレベルのPbを含む鉛ガラスと同様、 SiO_2 の網目構造の修飾酸化物として焼却残渣の重金属を取り込み不溶化することが可能と考えられた事による。とりわけ飛灰に多く含まれるPbの溶出抑制が最大のテーマであることから、スラグの溶出試験を中心に多方面で実験が進められた。

4.1.2 ダイオキシン対策としての溶融

焼却施設のダイオキシン類は90%以上が焼却灰や飛灰として排出され、排ガスの寄与率は10%ないしはそれ以下に過ぎず、焼却残渣の処理がこれからのダイオキシン低減のポイントになる。ごみ焼却炉本体では、燃焼室温度850~900℃以上、ガス滞留時間2秒以上でダイオキシン類や前駆物質を含む有機物質の熱分解には十分な効果が得られるとされた⁴⁾。1,200℃以上の温度条件で運転される溶融炉では、ダイオキシン類の熱分解に十分な温度条件が整うことから、焼却炉の様な配慮を必要とせず、容易にダイオキシン対策の実効が得られると考えられた。

4.1.3 資源化技術としての溶融

溶融技術の先達である製鉄分野では、スラグの規格化、資源化再利用ルートが確立されていることから、廃棄物分

野においても同様の効果が得られるとの期待があった。

4.2 溶融技術に対する批判

4.2.1 エネルギー多消費型技術

従来の焼却処理に比して溶融技術が必要とするエネルギーレベルが大きく異なることから、余熱利用として実績を積み大型連続炉では常識化している発電電力の消費、さらには炭酸ガスの排出増加要因として、溶融技術導入の効果に対する懸念があった。

4.2.2 コスト増加要因

溶融技術検討の初期には、イニシャルコスト灰トン当たり5千万～1億6千万円、ランニングコスト2～4万円とされ⁵⁾、現状のごみ処理コストを大幅に増大させるとの懸念があった。

4.2.3 システムの肥大化・複雑化要因

従来、法規制強化のつど個別設備を追加し、今や都市における一大総合プラントとなったごみ処理施設に、未経験な技術を取り入れることへの潜在的な懸念があった。

5 技術開発の現状と課題

これまでの溶融技術に関する諸研究を概観すると、要素技術の個々については改善の成果が認められるものの、インフラ整備の完成度において課題を残す。

5.1 重金属対策

都市ごみ処理分野の溶融技術では、炉内の酸素濃度が主要な管理因子であるとの認識がなかった。しかし、金属精錬・製鋼分野では、この酸素分圧が溶融過程の主要な因子の一つとして管理されてきたことは公知の事実であることから、代表的な灰組成(焼却灰70%、焼却飛灰30%、Pb1,800 mg/kg)を用い、多成分系溶融反応モデルの熱力学的シミュレーション解析を行った⁶⁾。その結果、スラグ性状のみならず、排ガス性状への影響ほか、重要な事実が明らかになった。結果を図3に示す。溶融炉内の酸素分圧とスラグのPb濃度には明らかな関係があり、酸素分圧が低い還元雰囲気ではスラグのPb濃度を100mg/kg以下に抑制できることが解る。酸素分圧の高い酸化雰囲気ではPb濃度が高くなるが同時に溶融温度の影響も大きく、温度の低いほうがスラグのPb濃度は高くなる結果、理論的には100%スラグへの封じ込めも可能になる。

検討初期の段階では、飛灰の混合処理がスラグ性状悪化の最大要因と考えられたことから、処理対象を焼却灰に限

定するケースが多かった。しかし、飛灰の混合率とスラグの鉛濃度との関係は図4のようになり、スラグの鉛濃度は飛灰の混入率には依存せず、むしろ飛灰単独処理のほうが鉛濃度は低値安定であることを示す。このように、飛灰処理の困難さはスラグ性状への影響にあるのではなく、排ガス組成、二次飛灰、さらにはダクト内でのダスト付着・閉塞などにあると言える。

Pbを例にみれば、スラグ化ないしは揮発除去のどちらも100%近い効率で制御可能と言える。重金属を揮発分離した場合はスラグからの溶出の懸念は低下するものの二次飛灰の処理・処分が課題として浮上し、スラグ化した場合は溶出の危険が増大することになる。

重金属スラグ化の可否と是非とは次元の異なるテーマであり、エネルギー効率やシステムの管理条件も含めた判定

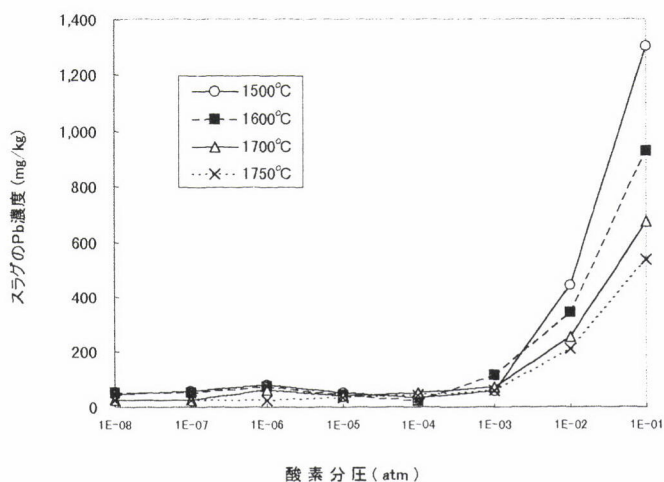


図3 スラグのPb濃度と炉内酸素分圧の関係

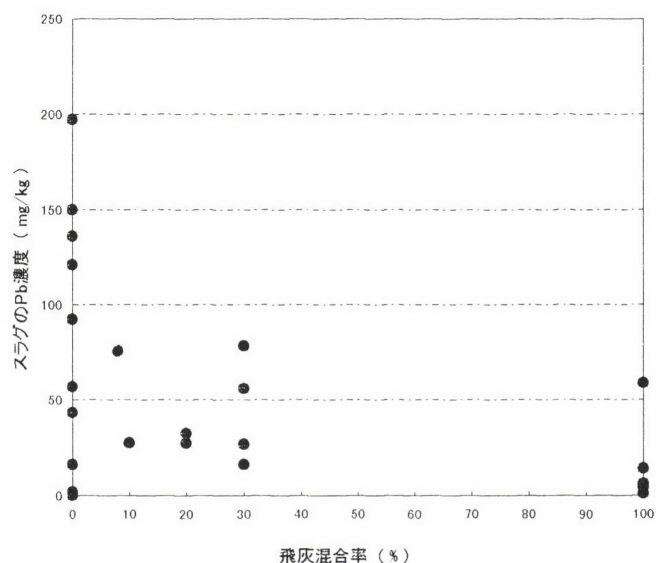


図4 飛灰混合率とスラグのPb濃度の関係

表1 焼却残渣、二次生成物の組成

元素	単位	原 料		二次生成物	
		焼却残渣	焼却飛灰	スラグ	溶融飛灰
Si	%	19.0	11.5	16.1	0.19
Al	%	6.35	7.36	10.16	0.06
Ca	%	14.5	17.6	16.7	0.23
Fe	%	3.34	0.83	3.26	0.055
Na	%	1.11	4.32	2.19	7.01
K	%	0.76	1.97	1.19	11.9
Mg	%	1.98	2.65	2.64	0.12
P	%	0.52	0.44	0.20	0.083
B	%	0.0081	0.0099	0.0137	0.0050
Mn	%	0.070	0.026	0.076	0.0035
Pb	%	0.068	0.26	0.0073	2.80
Cd	%	0.001	0.0060	0.0010	0.099
As	mg/kg	1.40	4.72	0.27	140
Hg	mg/kg	0.56	2.30	0.0050	1.27
Zn	%	0.32	0.99	0.19	10.5
Cu	%	0.088	0.071	0.13	0.29
Cr	%	0.070	0.033	0.056	0.015
Se	mg/kg	0.40	0.69	0.020	< 0.2
Sn	%	0.75	0.12	0.99	0.11
S	%	0.45	2.96	0.47	3.91
Cl	%	0.42	7.33	0.32	24.9
F	mg/kg	150	390	302	1390

が必要とされ、加えて、パイロメタラジーをはじめ、多くの分野の知見を総合した検討が不可欠と言えよう。参考に焼却残渣と二次生成物の例を表1に示す。

5.2 ダイオキシン対策

溶融に伴うダイオキシンの挙動は、基本的に焼却炉でのそれと同様ないしはそれ以上の配慮を必要とし、溶融炉本体からの排出、排ガス冷却過程における再合成および排ガス処理設備での消長のそれぞれに対応を要する。

溶融炉出口のダイオキシン濃度は新設焼却炉の炉出口以上のケースが多く(図5)、高温雰囲気下での有機物分解の期待に呼応する結果とは言い難い。これは、被溶融物を炉上部から挿入し溶融面に焼却残渣の層が形成される場合、焼却火格子の上部と同様とまではいかないまでもそれに類した不均一空間が形成され、乾燥・分解・揮発段階を経る結果、炉出口のガス性状にも影響したことによると推察され、溶融温度のみを指標に有機物の分解効果を判断するのは危険であると言える。

排ガスのダイオキシン対策としてバグフィルタの効果が評価され⁷⁾、排ガス処理設備のかなめとして認知されるに至った。新設炉はもちろん既設炉においても採用されていることを反映し、溶融排ガスにおいてもバグフィルタが当然の如く用いられてきた。しかし、溶融排ガスを対象としたバグフィルタでのダイオキシンは、図6のように150℃条件においても全く除去されず、従来の常識をくつがえす結果になっている。

ダスト類の固定炭素含有率と比表面積との関係を図7に示す。焼却飛灰にはダイオキシン除去に用いる活性炭と同程度ないしはそれ以上の固定炭素が含まれ、ダイオキシン

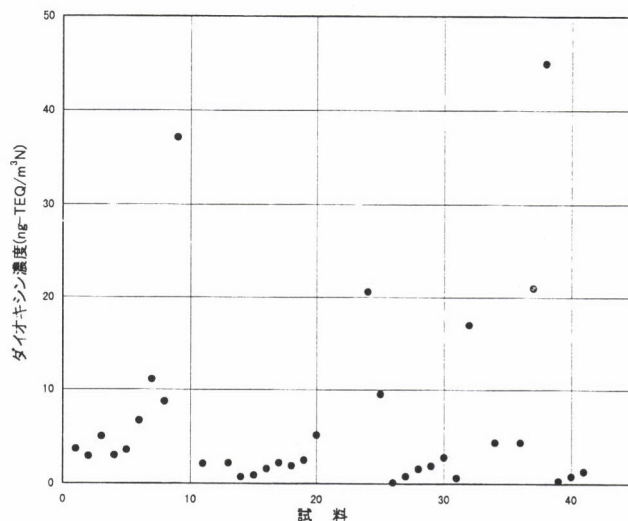


図5 溶融炉出口のダイオキシン濃度

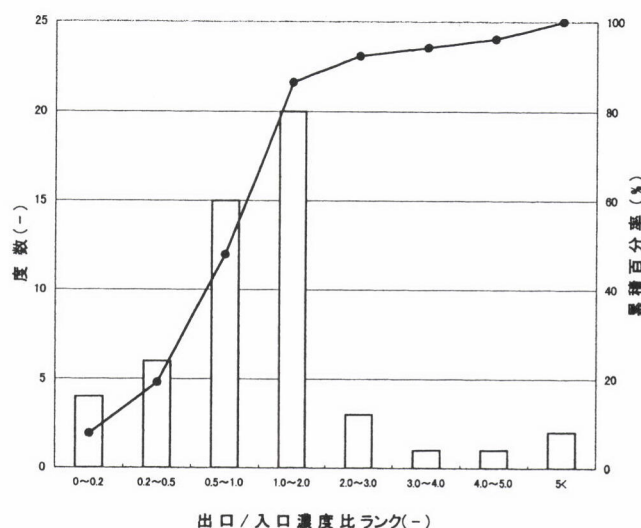


図6 バグフィルタ出・入ダイオキシン濃度比度数分布

類に対する吸着能が期待される。一方、溶融飛灰は固定炭素を含まず、炭素由来の除去効果が期待できない。

これらの事実、焼却排ガスにおけるバグフィルタの効果を否定するものではないものの、少なくとも溶融排ガスの集じん設備としてバグフィルタを用いる必然性は認められず、またバグフィルタであることのみでダイオキシン低減に有効になる訳ではないことが解る。これは、ろ過式集じん装置におけるダイオキシン除去の機序を明らかにしないまま設備導入に至った結果でもあり、その詳細の解明が急がれる。

ダイオキシン対策については、この他にも高温かつ水蒸気存在下での分解反応の促進、還元雰囲気での挙動、前駆体と呼ばれる一連の炭化水素群の指標性等々、生成・除去・

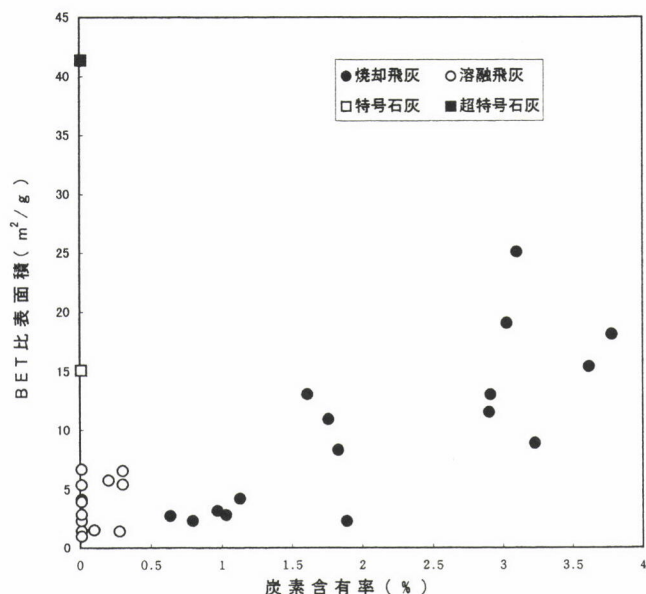


図7 炭素含有率と比表面積の関係

分解の各プロセスに関する課題が山積している。

ダイオキシン類の指標とされる一酸化炭素とダイオキシンについて、燃焼効率との関係を概念的に示したのが図8である。両者に相関があると考えて良いのは酸化燃焼の極めて狭い範囲でしかなく、すべての領域では、その濃度レベルの差異なども考慮すればむしろ指標性は無いと考えるべきである。このように、ダイオキシンに関する知見は未だ不完全なものが多く、削減対策の検討や効果評価にさいして慎重な配慮が必要になる。

5.3 環境負荷の抑制

溶融処理に伴う環境負荷としては、塩化水素、窒素酸化物、硫黄酸化物、ダストほか焼却処理の項目がすべて該当する。ここでは、ごみ処理固有のテーマであり、ダイオキシン生成への影響が懸念される塩化水素について考察する。

溶融炉からの塩化水素の排出は、焼却工程の排ガス処理と密接な関係があり、溶融工程における再生成という課題を内包する。溶融炉からガス冷却工程に至る間が強還元雰囲気中でアルカリ元素(Na+K)に対する塩素の当量比が1以下の場合、塩素はアルカリ塩化物として存在する。塩素過剰条件でも大半はアルカリ塩化物として存在するものの、塩化水素としての存在割合も増加する⁸⁾。しかし、酸素分圧が高い酸化雰囲気では、塩素の当量比に関係なく排ガス中塩化水素の存在割合が高くなる。



ごみ焼却に伴う塩化水素の生成は、塩化ビニルの熱分解による生成と、焼却炉の温度条件(850~950℃)でも起きる共役反応の進行による食塩からの発生とがある⁹⁾。

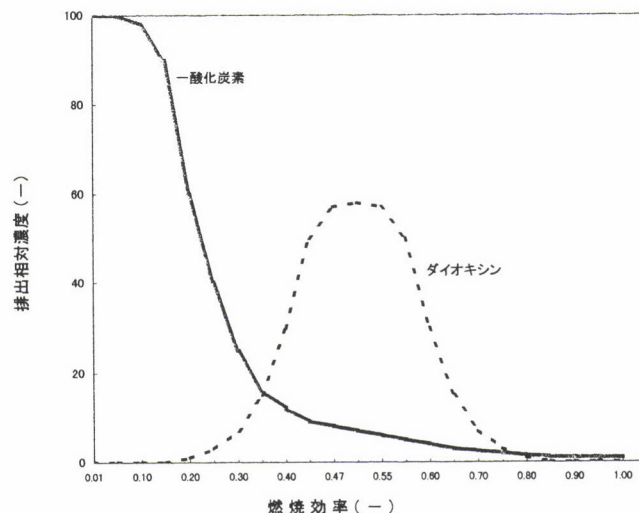
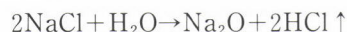
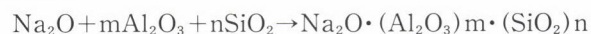


図8 燃焼効率とガス成分の関係

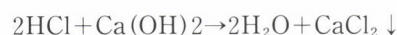
主反応



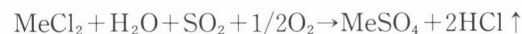
共役反応



この焼却排ガスに含まれる塩化水素はライムを用いて中和し、飛灰として捕捉回収される。



このライムとの反応生成物が飛灰とともに溶融工程に投入されると、以下の反応により再度塩化水素を生成することになる。



ここで、Meはアルカリおよびアルカリ土類元素を示し、 $\text{Na} < \text{K} < \text{Ca} < \text{Mg}$ の順で平衡定数が大きく、塩化水素生成量も増大する。この反応は無酸素条件では進行せず、還元雰囲気为主要なダイオキシン生成因子の一つである塩素負荷の抑制に有効であると同時に、排ガス処理過程における塩化水素の二重処理という無駄を回避できることを示す。

5.4 資源化技術としての溶融

5.4.1 スラグ

最多生成物であるスラグについては、土壤環境基準を満足する場合に限り、排出自治体の管轄区域内での使用に道が開けた段階にある。

多大なエネルギーを投入した結果のスラグが限られた条件においてのみ利用可能とされる必然性は乏しいが、その前提条件である安全性に関する知見が貧弱であることも原因している。

スラグの重金属溶出に関してその原因が明らかなのは、水砕水の汚濁による影響のみである。しかし、その水砕水の汚濁のメカニズムも詳細が解明されているわけではない。

水砕スラグは一般に5%程度の付着水を伴い、固液比10%の環境庁告示13号試験を行った場合、付着水Pb濃度の5/1000がスラグ自体の溶出値に上乘せされることになる。したがって、スラグ自体からの溶出がゼロであっても、付着水のPb濃度が2mg/L以上であれば土壤環境基準、0.01mg/Lを超過することになる。

水砕水の分析例は表2に示すとおりで、高濃度の鉛を含むことがある。しかし、そのほとんどはSS(浮遊物質)由来であり、溶解成分の寄与はきわめて低い。このSS中の重金属組成はスラグのそれと異なり溶融飛灰に一致することから、水砕水の汚濁メカニズムを次のように推察できる。

スラグ内の気泡の上昇速度(V)は次式で示される。

$$V = 2/9 * r^2 * g * (d_0 - d_1) / \eta$$

ここで、rは気泡の半径(cm)、gは重力加速度(cm/s²)、d₀、d₁はそれぞれスラグおよび気泡の密度(g/cm³)、ηはスラグの粘度(g/cm・s)を表す。Na₂O-CaO-SiO₂系ガラスでの試算¹⁰⁾によるとr=1mmでV=50cm/h、r=0.1mmでV=0.5cm/hになる。溶融工程におけるスラグの滞留時間はシャフト炉で数分ないしはそれ以下、湯浴を形成するタイプでも1時間程度でしかなく、ガス化成分の一部はスラグの気泡に保持されたまま冷却・破碎され、気泡部から放出された溶融飛灰相当分が液中のSSとして検出されたと推察される。これは、脱気を目的とした清澄工程を備える工業ガラスの製造ラインとは本質的に異なる点であり、廃棄物処理では温度上昇あるいは塩基度調整による粘度の低下、スラグの洗浄、水質管理の徹底などの対応が必要になる。

5.4.2 溶融飛灰

スラグが自治体の行政区域内においてアスファルト骨材などの路盤材として再利用可能であるのに対し、溶融飛灰は重金属を高濃度に含んでいるものの有価資源として扱える状況にはない。溶融飛灰の処理は非鉄の精錬プロセスにおける金属回収、すなわち山元還元が最良の策であることに異論はないであろう。しかし、鉛・亜鉛等、金属回収の実現に際しては自治体の管轄区域を越えた広域移動が不可

欠となり、加えて溶融飛灰を特別管理一般廃棄物である「ばいじん」と同様に考えればその扱い基準を遵守しなければならず、廃棄物という従来の概念の延長線上では対応不能な課題と言える。そのため、既存施設の溶融飛灰は埋め立て処分のみが行われているものの、重金属問題を二次飛灰に濃縮し先送りしたに過ぎず、処理の一貫性を欠くだけでなく、資源循環社会の構築にはほど遠い状況にあると言える。

5.5 エネルギー消費

溶融技術が従来の焼却技術に比して高いエネルギーレベルの管理が求められることは間違いない。しかし、現在のごみ質では、灰分の全量を溶融しても総発熱量の2~3%、発電電力量の15%程度でまかなうことができ¹¹⁾、売電他、余剰エネルギーの活用には支障はない。

ごみが保有するエネルギーを最大限に活用しつつ、自己完結の範囲内で環境対策や資源化を追求する場合でも、エネルギー多消費型技術の排りを免れないかは主権者の判断を求めるべきであろう。

5.6 コスト

溶融処理の二次生成物は、ミクロな経済収支や材料性状の評価において既存の一次資源と比較すべくもない。環境に係わるコスト分析には、費用・便益分析を初めとして多くの手法による検討が可能と考えられるが、その評価結果がクリティカル・ポイントになる。

5.7 処理システムとして具備すべき要件

廃棄物関連のインフラ技術としては、

- (1) 現行焼却炉なみの安定、連続操業が可能であること。
 - (2) 被処理物の変動への許容度が高く、20年以上の期間に渡り性能が維持されること。
 - (3) ダイオキシン対策の仕上げとして、高レベルの性能が確保されること。
 - (4) 既存施設との有機的連携が図られ、イニシャル・コストの圧縮が図られること。
 - (5) 現状と比較して遜色のない程度にランニング・コストが見積もられること。
- が必要であり、併せて、
- (6) 従前の「廃棄物の処理」から「都市型資源供給」への視点の転換
 - (7) 成り行きに終らざるを得ない処理技術の宿命と品質管理要求との乖離の相克
 - (8) 二次生成物が避けがたい廃棄物と資源の落差の解消、社会的認知
- にも努力が必要になる。

表2 スラグ水砕水他の組成

	スラグ 水 砕 水			スラグ	溶融飛灰
	水砕水	ろ過水 (1μm)	SS		
	mg/l	mg/l	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Zn	1600	0.3	13000	220	140000
Pb	590	0.04	5300	140	12000
Cu	120	< 0.01	1300	4000	5400
Cr	39	< 0.1	300	220	92
Cd	5.6	< 0.01	50	0.7	390

6 おわりに

管理の時代と言われて久しい。経済成長に伴い増加の一途を辿った廃棄物量に対する施設整備が一段落、「成長から持続的発展」は人類存続のキーワードとなっている。そこで必要なのは、あらゆる廃棄物を飲み込める「スーパーメルトー」ではなく、より付加価値の高いバランスの取れた技術に他ならない。

現行システムの中で最も確度の高い「焼却＋灰溶融」システムに残された課題への対応から、環境負荷低減、二次生成物の資源化再利用および地球温暖化ガスの排出抑制をテーマとして、次世代技術の開発が進められている。また、昨今の論議では、「直接溶融」、「灰溶融」ないしは「ガス化溶融」が技術の客観的比較考量がなされないままに「溶融技術」と言う枠の中で一括りに扱われる傾向にあることも否定できない。溶融技術の導入は、環境技術の再構築、質的向上の好機と捉えるべきテーマである。しかし、その選択を誤った場合、後世に多大なつづきを回すことに他ならないであろう。

引用文献

- 1) 厚生省生活衛生局水道環境部：日本の廃棄物処理，(1994)
- 2) 生活環境審議会産業廃棄物専門委員会報告書，(1995)
- 3) 溶融飛灰資源化研究会：溶融飛灰からの金属資源の回収，(1998)
- 4) ごみ処理に係るダイオキシン類発生防止等ガイドライン，(1997)
- 5) 廃棄物研究財団：平成5年度焼却灰等の広域溶融処理システム調査報告書，(1994)
- 6) 長田守弘ほか：第7回廃棄物学会研究発表会講演論文集，(1996)，476.
- 7) Environment Canada：The National Incinerator Testing and Evaluation Program, Air Pollution Control Technology Report EP S3/UP/2, September, (1996)
- 8) 徳田昌則：廃棄物の溶融技術・システムの高度化の基礎と炉内解析例，エヌ・ティー・エス，(1996)
- 9) 久保田宏ほか：第二回全国都市清掃研究発表会講演論文集，(1981)，116.
- 10) セラミック工学ハンドブック，技報堂，(1993)
- 11) 東京都清掃局：特別管理一般廃棄物(飛灰)の処理技術に関する共同研究結果要旨集－F. S. 編－，(1997)
(1999年3月1日受付)